

# Исследование линеек полупроводниковых лазеров с неустойчивыми резонаторами

Г.Т.Микаелян

*Впервые создана и исследована линейка диодных лазеров с неустойчивыми оптически связанными резонаторами. Получена генерация с выходной мощностью 4 Вт в режиме спектрально-узкополосной генерации.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, неустойчивый резонатор, фазированная линейка лазеров.

Полупроводниковый инжекционный лазер с неустойчивым резонатором был впервые предложен и исследован в работе [1]. В работах [2–14] эти исследования были продолжены; они подтвердили преимущества инжекционных лазеров с неустойчивым резонатором с точки зрения повышения стабильности распределения электромагнитного поля в плоскости р–п-перехода и роста пространственной когерентности в этом направлении. Использование вместо одной из естественных граней лазерного кристалла, являющейся для обычных инжекционных лазеров зеркалом резонатора Фабри–Перо, вогнутой в плоскости р–п-перехода грани, которая образует цилиндрическое зеркало, позволяет благодаря расширяющимся в поперечном сечении пучкам оптически связать различные области активного слоя. Таким образом, происходит оптическая синхронизация разных излучающих точек, разнесенных в широкой области активного слоя в плоскости р–п-перехода. Вследствие этого эффекта и происходит увеличение пространственной когерентности, а также стабилизация распределения излучения в пределах ширины активной области.

В настоящей работе приведены результаты исследований предлагаемой впервые линейки полупроводниковых инжекционных лазеров, которые состоят из излучающих элементов, представляющих собой лазеры с неустойчивыми резонаторами. Каждый лазерный элемент, имеющий неустойчивый резонатор, образован в едином кристалле лазерной линейки, фрагмент которого показан на рис.1,а. В зависимости от длины и периода повторения лазерных элементов линейка может содержать до 20 и более элементов. Линейка с лазерами из неустойчивых резонаторов изготавливалась из двойной гетероструктуры с разделительными оптическим и электронным ограничениями (РО ДГС). В плоскости р–п-перехода линейки каждый элемент представляет собой полосковый лазер с широким ( $W = 50$  или  $100$  мкм) контактом и с одной вогнутой гранью, вершина цилиндрической поверхности которой совпадает с центром полоскового контакта. Цилиндрическая грань изготавливалась методом фотолитографии с использованием полирующего травления в

плоскости [110]. При изготовлении синхронизированной линейки волноводный слой оставался целым по всей площади кристалла, т.е. эпитаксиальные слои каждого лазерного элемента не разделялись. Это необходимо для осуществления оптической связи между соседними лазерными элементами, в которых одним из зеркал неустойчивого резонатора является вогнутая цилиндрическая грань (рис.1,б).

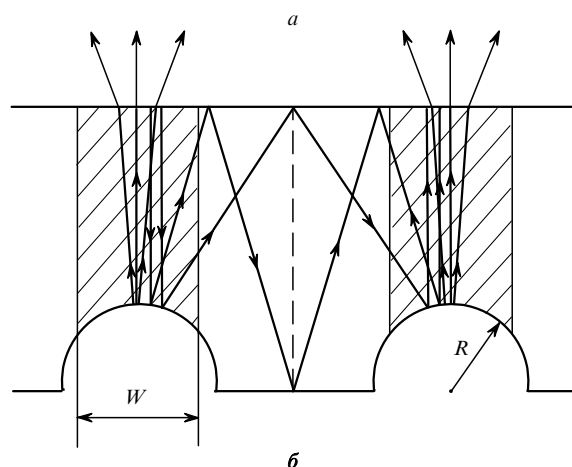
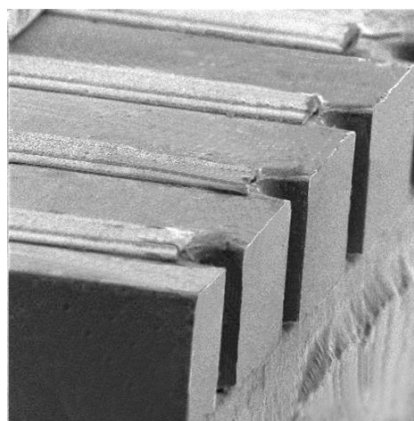


Рис.1. Фрагмент кристалла диодной линейки с неустойчивыми резонаторами, видны травленные вогнутые зеркала и широкие полосковые контакты (а), и схема примерного хода лучей в линейке с неустойчивыми резонаторами, оптически связывающих соседние резонаторы; накачиваемые участки (контакты) заштрихованы (б).

Г.Т.Микаелян. ФГУП «Научно-производственное предприятие "Инжект"», Россия, 410052 Саратов, просп. 50 лет Октября, 101; e-mail: inject@overta.ru

Поступила в редакцию 10 апреля 2006 г.

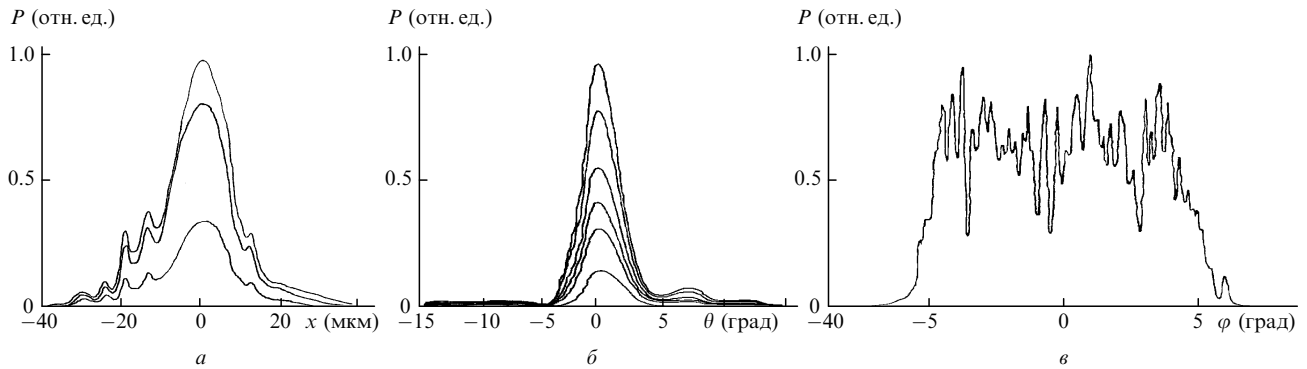


Рис.2. Распределение излучения при различных токах накачки в ближней зоне (на плоском зеркале) лазера с неустойчивым резонатором, виден фрактальный характер распределения (*a*), диаграмма направленности излучения, выходящего из плоской грани неустойчивого резонатора диодного лазера (*b*), и распределение излучения в дальней зоне линейки лазеров с неустойчивыми резонаторами, видно интерференционное (когерентное) сложение диаграмм направленностей отдельных лазерных элементов (*в*).

На рис.1,*б* показано распространение лучей в линейке лазерных элементов с неустойчивыми резонаторами. Области протекания тока заштрихованы. Дан пример хода обратных лучей, благодаря которым осуществляется оптическая связь и синхронизация (фазировка) между каждым двумя соседними лазерными элементами. Часть расходящихся волн одного из лазеров с неустойчивым резонатором после отражения от плоской грани кристалла лазерной линейки превращается в обратные сходящиеся волны для соседнего лазерного элемента. Эти волны, сжимаясь к оси резонатора, после определенного числа проходов превращаются благодаря дифракции в расходящиеся. В качестве таких волн могут служить и те волны, которые неоднократно отражаются на противоположных плоских гранях кристалла, находящихся между лазерными элементами. Обратная сходящаяся волна, которая распространяется по ненакачиваемой части волновода, имеет незначительные потери в волноводе из-за малой ( $\leq 10$  нм) толщины активного слоя по сравнению с толщиной ( $\sim 0.3$  мкм) волноводного слоя. В связи с этим потери интенсивности в ненакачиваемой части кристалла лазерной линейки не препятствуют проникновению обратной волны лазера с неустойчивым резонатором в резонатор соседнего лазера с таким же неустойчивым резонатором.

Роль сходящейся волны в процессе возникновения генерации в неустойчивых резонаторах с большими коэффициентами увеличения изучалась в работах [15, 16]. В нашем случае обратная волна осуществляет также оптическую связь между отдельными элементами линейки диодных лазеров с неустойчивым резонатором. Благодаря этой связи происходит синхронизация каждого двух соседних лазеров в линейке, что в итоге приводит к синхронизации всех лазеров.

Результаты экспериментальных исследований лазерных линеек и отдельных элементов инжекционных лазеров с неустойчивыми резонаторами приведены на рис.2. На рис.2,*a* показано распределение излучения в ближней зоне на плоской грани одного из излучающих элементов лазерной линейки, на рис.2,*б* – распределение излучения в дальней зоне этого же лазера. Лазерный элемент представляет собой лазер с неустойчивым резонатором, образованным с одной стороны плоской, а с другой – вогнутой (радиус кривизны  $R = 40$  мкм) гранями кристалла; расстояние между зеркалами  $L \approx 400$  мкм, ширина полосового контакта  $\sim 50$  мкм. Как видно из рис.2*a* и *б*, рас-

пределение излучения как в ближней, так и в дальней зоне является стабильным и однородным в широком диапазоне токов накачки. Так же как и в работах [1, 3, 6], распределение излучения основной моды в ближней зоне имеет фрактальный характер, что свойственно лазерам с неустойчивым резонатором [17]. Природа фрактального распределения излучения основной моды в неустойчивом резонаторе подробно изучалась в [17, 18].

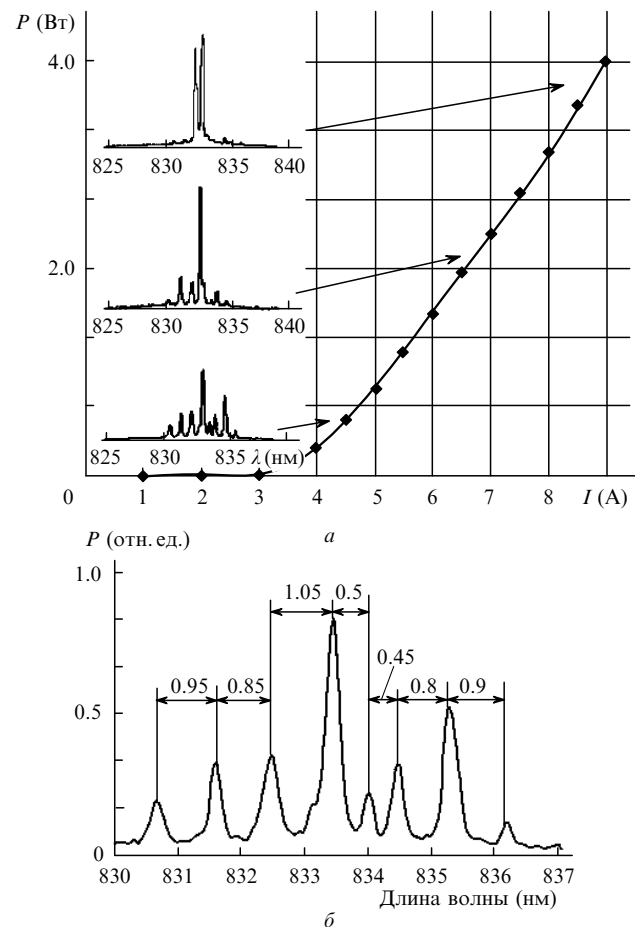


Рис.3. Ватт-амперная характеристика и спектры излучения линейки диодных лазеров с неустойчивыми резонаторами (*a*) и спектральный состав излучения линейки диодных лазеров с неустойчивыми резонаторами на начальном участке ватт-амперной характеристики, показанной на рис.3,*a* при токе  $I = 4$  А; видны неэквидистантно расположенные максимумы (расстояния даны в нанометрах) (*б*).

На рис.2,*б* приведено распределение излучения в дальней зоне фазированной линейки диодных лазеров, составленной из оптически связанных между собой лазерных элементов с шагом между ними 250 мкм. Видно, что имеет место интерференционное (когерентное) сложение электромагнитных волн, свидетельствующее о пространственной когерентности излучающих областей различных лазерных элементов.

На рис.3,*а* показаны ватт-амперная характеристика и спектры излучения фазированной линейки лазерных диодов, состоящей из 14 лазерных элементов с неустойчивыми резонаторами, при разных уровнях тока накачки. На рис.3,*б* представлен спектр излучения линейки на начальном участке ватт-амперной характеристики при токе накачки 4 А. Наблюдаются неэквидистантно расположенные отдельные спектральные максимумы. Расстояния между ними не соответствуют предполагаемому межмодовому расстоянию – они, по-видимому, относятся к спектральным пикам отдельных элементов лазерной линейки. С увеличением мощности излучения благодаря оптической связи между отдельными элементами спектр становится близким к одночастотному. При трехкратном превышении порога генерации наблюдаются всего два рядом расположенных максимума при подавлении остальных, наблюдавшихся вначале генерации.

Проведение дальнейших исследований с целью определения оптимальных значений радиуса кривизны зеркал, длины резонатора, ширины накачиваемой области, расстояния между отдельными элементами и других параметров линеек позволит создать более эффективные и мощные фазированные диодные лазерные линейки.

Интересным с точки зрения наблюдения новых физических эффектов могут оказаться линейки диодных лазеров с неустойчивыми резонаторами при близком расположении элементов. Например, если линейка, состоящая из лазерных элементов с шириной контакта  $\sim 5$  мкм, имеет шаг (период повторения элементов) примерно 20 мкм, то грань этой линейки, на которой расположены зеркала

неустойчивого резонатора, можно рассматривать как дифракционную решетку с периодом 50 штр./мм. Такое совмещение дифракционной решетки с усиливающей средой – активной областью диодной лазерной линейки, по-видимому, приведет к появлению новых свойств излучения этих линеек и может оказаться интересным направлением исследований.

1. Богатов А.П., Елисеев П.Г., Манько М.А., Микаелян Г.Т., Попов Ю.М. *Квантовая электроника*, **7** (5), 1089 (1980).
2. Craig R.R., Casperson L.W., Evans G.A., Jang J.J.J. *Proc. CLEO'84* (Anahem, Cal., 1984, paper ThR4).
3. Salzman J., Venkatesan T., Lang R., Mittelstain M., Yariv A. *Appl. Phys. Lett.*, **46** (3), 218 (1985).
4. Craig R.R., Casperson L.W., Stuffsudd O.M., Jang J.J.J., Evans G.A., Daridheiser R.R. *Electron Lett.*, **21**, 62 (1985).
5. Casperson L.W. *Opt. Quantum Electron.*, **18**, 155 (1986).
6. Lang R.J., Salzman J., Yariv A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **22** (3), 463 (1986).
7. Yamashita S., Nakatsuka S., Tanaka T., Ono Y., Chinone W., Kajimura T. *Appl. Phys. Lett.*, **51** (21), 1667 (1987).
8. Nakatsuka S., Tatsuno K. *Laser Diode Technology and Applications*, **1043**, 87 (1989).
9. Champagne Y., McCarthy W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (3), 321 (1991).
10. Largent G., Allen M., Schaus Ch., Jang J., Jansen M., Gallant D. *Proc. CLEO-91* (Baltimor, 1991, p. 140, paper CTuQ3).
11. Pixton A.H., Schaus Ch.F., Srinivasaran T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (11), 2784 (1993).
12. Lang R.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (1), 31 (1994).
13. Ru P., Chow W.W., Moloney J.V., Koch S.W. *Appl. Phys. Lett.*, **64** (12), 1469 (1994).
14. Guel-Sandaral S., Pixton A.H., Srinivasaran T., Sun S.Z., Hersee S.D., Allen M.S., Moder Ch.E., Gallant D.J., Dente G.C., Mcinerney J.G. *Appl. Phys. Lett.*, **66** (16), 2048 (1995).
15. Исаев К.А., Казарян М.А., Петраш Г.Т., Раутиан С.Г. *Квантовая электроника*, **1** (6), 1379 (1974).
16. Исаев К.А., Казарян М.А., Петраш Г.Т., Раутиан С.Г., Шалагин А.М. *Квантовая электроника*, **4** (6), 1325 (1977).
17. Berry M. V., Storm C., Saarloos W. *Opt. Commun.*, **197**, 393 (2001).
18. Berry M.V. *J. Mod. Opt.*, **50** (1), 63 (2003).